

ESTIMATION AF TURMATRICER UD FRA SNITTÆLLINGER - TO METODER

Otto Anker Nielsen, Forskningslektor, Ph.D.

Institut for Planlægning (IFP) - Trafikstudier, DTU, Bygning 115, 2800 Lyngby

Telefon 45 25 15 14; Fax 45 93 64 12; Email onielsen@ivtb.dtu.dk

1 INDLEDNING

I praktiske modelarbejder er det ofte meget ressourcekrævende at etablere viden om trafikanternes turmønstre i form af turmatricer. Derfor kan der opnås store besparelser ved brug af metoder, der estimerer matricerne ud fra snittællinger. Men de fleste af disse metoder bygger på meget simplificerede forudsætninger, f.eks. simplificerede rutevalgsmodeller eller at tællingerne er fejlfri deterministiske variable (Nielsen, 1994a). Uden disse forudsætninger er metoderne så beregningstunge, at de er uanvendelige i praktiske modelarbejder.

Artiklen beskriver to metoder til estimation af turmatricer, der ikke har disse problemer. I begge metoder udjævnes inkonsistente tællinger af andre tællinger, hvorved resultatet ikke påvirkes så alvorligt som i de fleste andre matrixestimationsmetoder. Derudover tager rutevalgsmodellerne både hensyn til kapacitetsproblemer, tilfældige forskelle i rutevalg samt forskelle i trafikanters præferencer. Dette giver en mere virkelighedsnær beskrivelse af trafikken, end med mere simplificerede modeller (Nielsen, 1996a & b).

Den første metode, Single Path Matrix Estimation – SPME (Nielsen, 1994a & b), er forholdsvis let at implementere og kan i et vist omfang bygge videre på eksisterende modelpakker (er i øvrigt siden blevet indbygget i TransCAD, Caliper 1996). SPME udnytter imidlertid kun tællingerne langs de 'optimale' ruter. Den nye metode, Multiple Path Matrix Estimation – MPME (Nielsen, 1997a), er derimod vanskeligere at implementere, men udnytter alle ruter mellem hvert zone-par til estimationen, og afspejler derved rutevalgsmodellerne bedre end SPME.

MPME er benyttet i flere fuldskala trafikmodeller med gode resultater. I nogle af tilfældene blev den sammenlignet med SPME samt ME2-metoden, der ofte benyttes i praktisk modelarbejder. Her gav MPME de laveste afvigelser fra tællinger, samtidig med at konvergerede pænt inden for en rimelig beregningstid.

Artiklen indledes i afsnit 2 med en generel diskussion af metoder til estimation af turmatricer og trafikmodeller, mens afsnit 3 præsenterer SPME og afsnit 4 MPME. Derefter beskriver afsnit 5 kort afprøvninger af metoderne, mens afsnit 6 diskuterer deres brug i praksis. Artiklen afsluttes med en konklusion og diskussion af metoderne.

2 ESTIMATIONSGRUNDLAGET FOR TRAFIKMODELLER

Rejsevaneundersøgelser er nødvendige for at få en mere grundlæggende viden om rejseadfærd og præferencer, men der er også en række ulemper ved at estimere trafikmodeller direkte ud fra interviews:

- Omkostningerne er store, fordi det er nødvendigt med en mange interviews for at få en

rimelig turmønsterbeskrivelse.

- Alligevel er der ofte for lidt data til at beskrive lokale karakteristika.
- Trafikmodeller estimeret ud fra generelle interviews har ofte svært ved at modellere trafikken præcist på strækningsniveau, idet tællinger herfor ikke benyttes direkte til estimationen.
- Et værdifuldt materiale i ældre turmatricer indgår ikke i estimationen.

Derfor er trafikmodeller i de senere år i stigende omfang blevet estimeret ud fra trafiktællinger, der er langt billigere at tilvejebringe. De *ustrukturerede estimationsmetoder* (Tamin & Willumsen, 1989) estimerer turmatricer ud fra *trafiktællinger* og en udgangsmatrix uden at antage nogen generel sammenhæng (eller *struktur*) af trafikanternes adfærd. Dog er det i metoderne nødvendigt at inkludere en model for trafikanternes rutevalg. Udgangsmatricen er nødvendig som supplerende information til tællingerne, fordi den ønskede matrix som regel rummer langt flere elementer, end der er tællinger. Den nye matrix kan derefter benyttes som grundlag for estimeringen af en trafikmodel, hvilket derved foretages *indirekte* i forhold til tællingerne. Ustrukturerede metoder vil – i udgangssituationen – ofte opnå en næsten perfekt overensstemmelse med trafiktællinger, men kan ikke desto mindre give problemer:

- Det er ikke nødvendigvis sikkert, at udlagte trafikstrømme svarer til de virkelige, idet estimationsproblemet er stærkt underbestemt (antal matrix-elementer overstiger langt antal tællinger).
- Data fra ældre trafikanalyser benyttes kun indirekte til estimationen i form af den ældre turmatrix.
- Matrixestimationsmetoder giver kun en indirekte forklaring af rejsemønstre. Således er de ikke velegnede som grundlag til estimation af mere strategiske eller langsigtede modeller.

De *strukturerede metoder* (Ortúzar & Willumsen, 1990; p.303, Willumsen, 1981) estimerer trafikmodeller *direkte* ud fra tællinger. Herved antages det – á priori - at rejsemønstret kan beskrives hensigtsmæssigt med modellens generelle udformning (Tamin & Willumsen, 1989) eller *struktur*. Teknikken deler nogle af ulemperne ved de traditionelle rejsevaneundersøgelser:

- Der tages ikke hensyn til specielle lokale karakteristika.
- Eksisterende turmatricer udnyttes ikke til estimationen.
- Det forudsættes, at hele trafikmodelkomplekset kan estimeres i ét trin fra tællingerne, hvilket kun er muligt for stærkt simplificerede modeller.

Ben-Akiva & Morikawa (1989) omtaler, at *datafusionsmetoder* kan udnytte fordele ved datakilder og kompensere for deres ulemper ved at kombinere dem i en fælles database. Et eksempel på en sådan metode er Ben-Akiva (1987) der både benytter rejsevaneundersøgelser og tællinger til *direkte* at estimere en trafikmodel. Imidlertid er det kun lykkedes at estimere forholdsvis simple trafikmodeller v.h.a. datafusionsmetoder. Det er næppe realistisk at datafusionsmetoder vil kunne benyttes til estimation af større modeller, der ikke kan formuleres som et enkelt estimeringsproblem.

Således forekommer det i praksis vanskeligt at benytte både tællinger og rejsevaneundersøgelser i den direkte matematiske estimation af modellerne - men nok i en mere ad hoc præget 'trial-and-error' estimation. I stedet for slet ikke at benytte tællingerne til estimationen kan de imidlertid benyttes til at estimere turmatricer, der derefter kan indgå i estimationen af trafikmodellen. Derudover kan de estimerede matricer benyttes som pivotmatricer eller direkte som input til mere simplificerede modeller til evaluering af netændringer på et operationel eller taktisk niveau (Nielsen, 1994b).

3 SINGLE PATH MATRIX ESTIMATION - SPME

I det følgende gennemgås SPME kort – for en mere grundig gennemgang henvises til Nielsen (1994a & b). Baggrunden for udviklingen af metoden var, at eksisterende matrixestimationsmetoder har svært ved at håndtere inkonsistente eller stokastiske tællinger. Dette er ofte tilfældet p.g.a. tilfældige variationer i trafikken, i tilfælde hvor tællingerne er indsamlet af forskellige myndigheder eller simpelt hen p.g.a. en simplificeret trafiknet- og zonestruktur. Derudover bygger de eksisterende metoder sjældent på mere avancerede rutevalgsmodeller som anbefalet af Nielsen (1996b). Dette er særligt et problem i store eller mellemstore byområder.

3.1 Principperne bag SPME

SPME estimerer den nye matrix med henblik på at opnå en så god overensstemmelse med tællingerne som muligt. Dette betyder, at udgangsmatricen muligvis ændres mere end i mange andre matrixestimationsmetoder. Dette er ofte rimeligt – f.eks. når en ældre matrix ønskes opdateres ud fra nyere interviews. Som i alle matrixestimationsmetoder rummer SPME også en *netudlægningsmodel* (traffic assignment). I SPME kan den være af en hvilken som helst type. SPME estimerer hvert element (zone-par) med henblik på at minimere den gennemsnitlige afvigelse mellem talt og beregnet trafik ad den *optimale rute* mellem zone-parret (deraf navnet *Single Path Matrix Estimation Method*). Dette gøres ud fra den *forventede trafik* for hver strækning med trafiktællinger:

$$T_{(E)ija} = \frac{V_a}{T_a} \cdot t_{ij} \quad (1)$$

$T_{(E)ija}$ er den *forventede (expected)* trafik mellem zone i og j med hensyn til snittælling V_a på strækning a . T_a er den udlagte trafik og t_{ij} er et element i udgangsmatrixen eller i matricen fra sidste iteration i SPME.

V_a/T_a er den faktor som T_a skulle have været multipliceret med for at reproducere V_a . Antagelsen bag SPME er derved, at alle matrix-elementer med hensyn til en tælling bør ændres med samme faktor for at reproducere tællingen. Den simpleste estimationsmetode er derefter at tage gennemsnittet af de forventede trafikmængder for hver rute (se Nielsen, 1994a eller Nielsen 1997a for en grundigere gennemgang):

$$T_{ij} = \frac{1}{N_{a \in (t,r)}} \cdot \sum_{a \in (t,r)} T_{(E)ija} \quad (2)$$

t er mængden af strækninger med talt trafik langs den optimale rute r . N er antal tællinger langs ruten.

Hvis rutevalgsmodellen er afhængig af trafikmængderne, vil udlægningen af den nye matrix

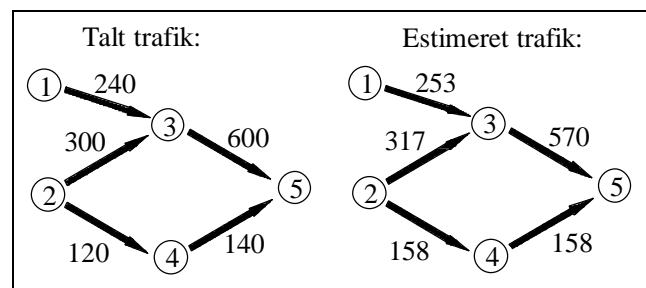
give et andet rutemønster end det, der blev benyttet til estimationen. Derfor må estimationen foretages efter en iterativ fremgangsmåde:

- 1) Initialisering: Sæt iterationsnummer $n:=1$ og turmatricen lig udgangsmatricen.
- 2) Udlæg turmatricen på trafiknettet og gem resultatet på strækningsniveau.
- 3) Estimer en ny matrix efter formel 2.
- 4) Stopkriterium: Stop jvf. ét eller flere stopkriterier – Ellers gå til trin 2.

Algoritmen er ret effektiv, idet trin 2 kan følge en hvilken som helst rutevalgsmodel (inkl. standardsoftware), mens trin 3 bygger på en simpelt alt-eller-intet algoritme.

3.2 Beregningseksempler

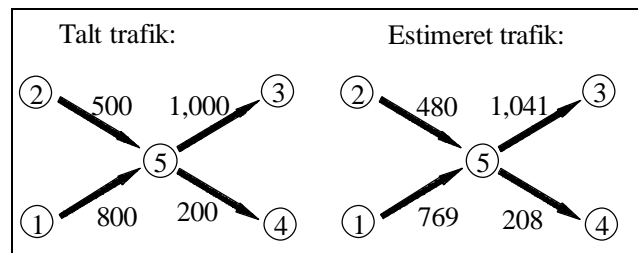
Tabel 1 viser brugen af SPME på figur 1's trafiknet. Udgangsmatricen rummer to elementer $T_{15}=300$ og $T_{25}=360$, men løsningen er uafhængig heraf, fordi der er flere tællinger end matrix-elementer. Rutevalget er fast; T_{25} vælger 2-3-5 og 2-4-5 med sandsynlighederne $2/3$ og $1/3$. I hver iteration udregnes den forventede trafik for hvert matrix-element (f.eks. T_{15}) ud fra elementet fra den foregående iteration (f.eks. 300 fra første) multipliceret forholdet mellem talt og udlagt trafik (f.eks. en forventede trafik på $240/300 \cdot 300 = 240$ for strækning 1-3). Hvert element estimeres da som gennemsnittet af de forventede trafikmængder langs ruten mellem det tilhørende zone-par. Efter 10 iterationer ændrer resultatet for hhv. T_{15} og T_{25} kun på anden decimal og resultatet er 253,44 og 474,85.



Figur 1 Trafiknet med inkonsistente tællinger

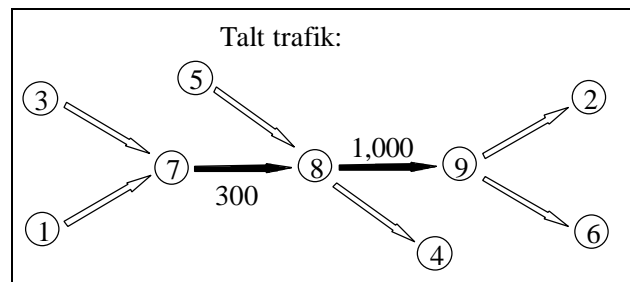
Ydre løkke	Rute	Netudlægning og forventet trafik på strækningsniveau:					Matrixestimation:	
		a_{1-3}	a_{3-5}	a_{2-3}	a_{2-4}	a_{4-5}	$T_{15(n-1)}$	$T_{25(n-1)}$
Trafiktælling, V_a og udgangsmatrix $T_{ij(0)}$		240	600	300	120	140	300	360
Netudlægning	r_{1-3-5}	300	300	-	-	-		
	r_{2-3-5}	-	240	240	-	-		
	r_{2-4-5}	-	-	-	120	120		
	$T_{a(0)}$	300	540	240	120	120		
Matrix estimation	$T_{(E)1-3-5}$	240	333,33	-	-	-	286,67	-
	$T_{(E)2-3-5}$	-	400	450	-	-	-	425
Netudlægning	r_{1-3-5}	286,67	286,67	-	-	-		
	r_{2-3-5}	-	283,33	283,33	-	-		
	r_{2-4-5}	-	-	-	141,67	141,67		
	$T_{a(1)}$	286,67	570	283,33	141,67	141,67		
Matrix estimation	$T_{(E)1-3-5}$	240	301,75	-	-	-	270,88	-

Figur 2 viser et andet eksempel på et trafiknet med inkonsistente tællinger. Udgangsmatricen har i dette tilfælde tre elementer T_{24} , T_{23} og T_{13} - hver med 200 ture. Efter 30 iterationer ændres resultatet kun på anden decimal og er hhv. 208,31, 272,49 og 769,20. Til sammenligning giver den analytiske løsning ved minimering af den vægtede kvadratafgivelse mellem talt og udlagt trafik hhv. 208,00, 272,00 og 767,00 (se også afsnit 4.2).



Figur 2 Trafiknet med inkonsistente tællinger.

Figur 3 viser derimod et eksempel på et trafiknet med konsistente tællinger, hvilke per definition vil blive reproduceret eksakt af SPME. Udgangsmatricen har her tre zone-par $T_{12}=200$, $T_{34}=200$ og $T_{56}=600$. Efter 10 iterationer ændres elementerne kun på anden decimal og løsningen er hhv. 184,32, 115,69 og 815,66. Til sammenligning er den analytiske løsning på minimering af den vægtede kvadratafgivelse mellem udgangsmatricen og den estimerede matrix hhv. 185,71, 114,29 og 814,29.



Figur 3 Trafiknet med konsistente trafikttællinger.

3.3 Valg af rutevalgsmodel og netudlægning i SPME

Rutevalgsmodeller og netudlægning diskuteres ofte i litteraturen (se f.eks. Nielsen, 1996b). De tidligere Logit-baserede modeller byggede på en antagelse om at forskellige ruter er uafhængige (f.eks. Dial, 1971), hvorved de gav problemer i trafiknet med overlappende ruter (Sheffi, 1985, pp.294-297). Dette er næsten altid tilfældet i virkelige trafiknet - i særlig grad i byområder. Daganzo & Sheffi (1977) foreslog at benytte Probit-baserede modeller for at undgå dette problem, og Sheffi & Powell (1981) formulerede en løsningsalgoritme herfor. Et lignende princip ligger bag Stokastisk Bruger Equilibrium modellen (Stochastic User Equilibrium, SUE), der også tager hensyn til kapacitetsproblemer i nettet. SUE blev foreslået af Daganzo & Sheffi (1977), mens Sheffi & Powell (1982) formulerede en operationel løsningsalgoritme.

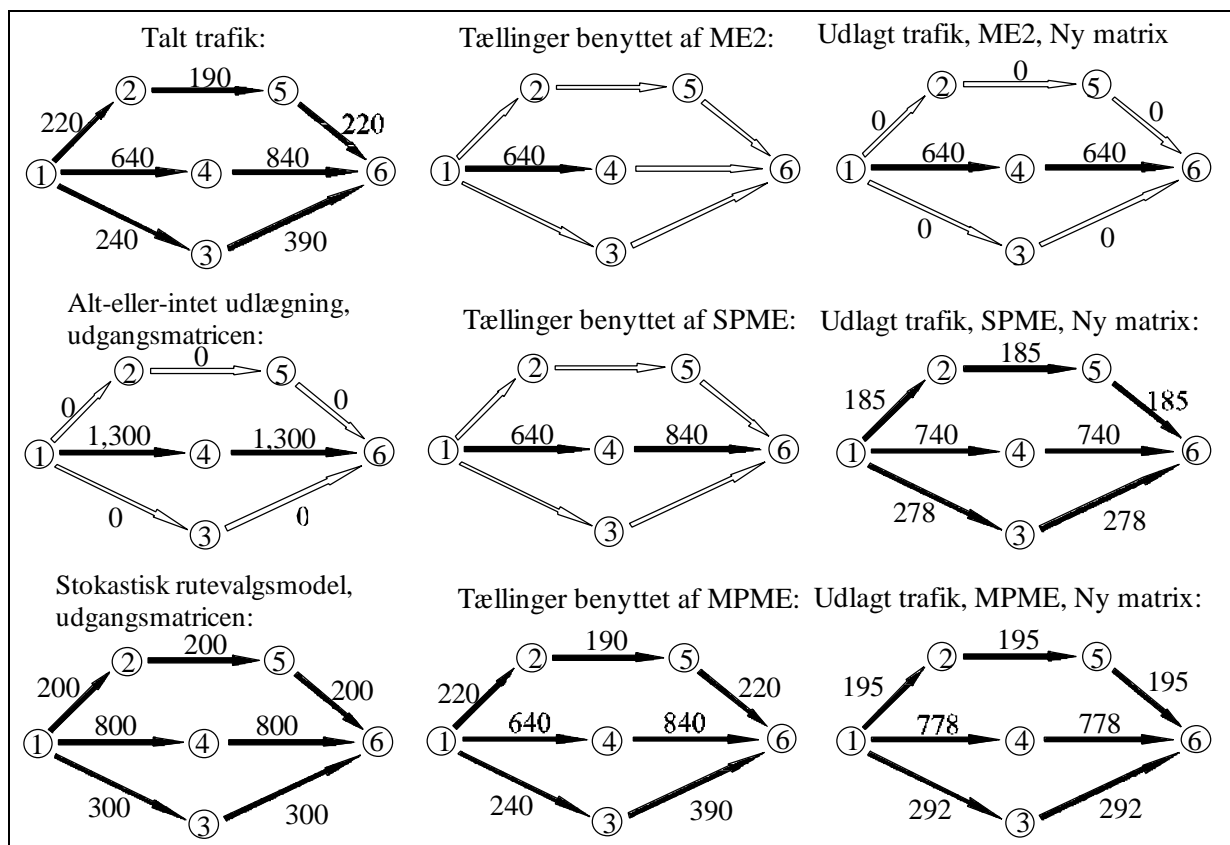
Det diskuteres ofte, hvornår man bør benytte en Probit-baseret netudlægning, en deterministisk kapacitetsafhængig (bruger equilibrium - User Equilibrium, UE) eller en kombination heraf. Probit-baserede modeller kan benyttes i trafiknet uden kapacitetsproblemer, UE i stærkt belastede net, mens SUE bør benyttes i medium belastede net (Sheffi, 1985, p.336-339). Imidlertid optræder alle tre belastningsniveauer i de fleste Danske byområder, hvorfor det generelt frarådes, at benytte andre netudlægningsprincipper end SUE (Nielsen, 1996a & b). Også van Vuren (1994) og Slavin (1996) anbefaler SUE. I Nielsen (1996a) blev SUE forbedret for også at tage hensyn til forskelle i trafikanters præferencer, Nielsen (1997b) diskuterer mere teoretiske aspekter af SUE, mens Nielsen et.al.

(1997) anbefaler at inkludere modellering af krydsforsinkelser i netudlægningen.

3.4 Diskussion af SPME

SPME benytter som nævnt kun tællingerne langs den optimale rute mellem hvert zone-par. Begrundelsen er, at de relative afvigelser mellem talt og udlagt trafik ad denne rute giver et rimeligt bud på matricelementet. Denne simplificering blev taget for at sikre en rimelig beregningskompleksitet af SPME. Praktiske erfaringer i Danmark såvel som i udlandet (SPME er nu implementeret i TransCAD 3.0 af Caliper, 1996) viser at SPME som regel konvergerer hurtigt og at den giver rimelige resultater i praksis. Imidlertid udnytter SPME ikke fuldt ud rutemønstret fra netudlægningen og den konvergerer ikke altid helt pænt. Dette er især tilfældet i trafiknet med mange ruter med sammenlignelige rejsemønstre.

Figur 4 viser et simplificeret trafiknet (også gengivet Nielsen 1994b), hvor resultater sammenlignes med den ofte benyttede ME2-metode (Maximum Entropy matrix estimation, Van Zuylen & Willumsen, 1980 og Ortúzar & Willumsen, 1990), SPME og MPME (se afsnit 4). Figuren viser hvor mange tællinger, der påvirker det endelige resultat (den midterste søjle) og den derfor udlagte trafik (den højre søjle). Trafikken blev for SPME og MPME udlagt på nettet efter en stokastisk model.



Figur 4 Sammenligning af ME2, SPME og MPME for trafik mellem knude 1 og 6.

I ME2, svarer den estimerede trafik for zone par 1-6 til den sidst benyttede tælling i algoritmen, f.eks. strækning 1-4 svarende til 640 biler. Således afhænger resultatet stærkt af den tilfældige rækkefølge som strækningernes ID'er optræder med i databasen. I SPME er de relative afvigelse ad den optimale rute $(640-800)/800 = -20\%$ og $(840-800)/800 = 5\%$, hvilket

resultater i forventede trafikmængder på $1.300 \cdot 80 \% = 1.040$ og $1.300 \cdot 105 \% = 1.365$. Trafikken estimeres da til $(1.040 + 1.365)/2 = 1.203$. MPME estimerer trafikken til 1.265 som vist i tabel 2.

Selv for dette meget simple eksempel ses, at SPME og MPME giver et langt bedre resultat end ME2, mens MPME kun giver en lille forbedring i forhold til SPME. Som det vil fremgå af afsnit 5 giver MPME imidlertid større forbedringer på større trafiknet, fordi der her er flere parallelruter.

Rute	1-2-5-6	1-3-6	1-4-6	Sum
Forventet trafik per strækning	1-2: 220 2-5: 190 5-6: 220	1-3: 240 3-6: 390	1-4: 640 4-6: 840	
Estimat	210	315	740	1.265

Tabel 2 MPME benyttet på eksemplet i figur 4.

4 MULTIPLE PATH MATRIX ESTIMATION - MPME

Trafikken mellem hvert zone-par estimeres i MPME som summen af forventet trafik ad hver rute multipliceret sandsynligheden for at vælge den pågældende rute (formel 3a). Den forventede trafik for hver rute beregnes som gennemsnittet af de forventede trafikmængder beregnet ud fra de enkelte tællinger langs ruten (formel 3b). Beregning heraf (formel 3c) bygger på samme princip som formel 1 for SPME (i det meget simple tilfælde, hvor der kun er én rute mellem hvert zone-par giver de to metoder derfor samme resultat).

$$T_{ij(n)} = \sum_r (T_{(E)ijr} \cdot p_{ijr}) \quad \text{hvor} \quad (a)$$

$$T_{(E)ijr} = \frac{1}{N_{a \in (t, r)}} \cdot \left(\sum_{a \in (t, r)} T_{(E)ija} \right) \quad \text{og} \quad (b) \quad (3)$$

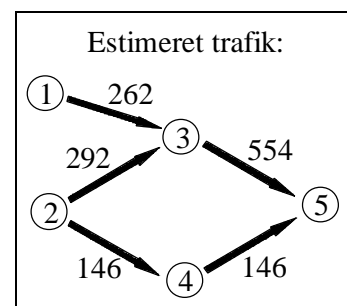
$$T_{(E)ija} = \frac{V_a}{T_{a(n-1)}} \cdot T_{ij(n-1)} \quad (c)$$

Hvor $T_{(E)ija}$ er den forventede trafik mellem zone i og j på strækning a . t er mængden af strækninger med talt trafik. p_{ijr} er sandsynligheden for at rute r benyttes mellem zone i og j . n er iterationsnummeret.

Formel 3 kan i meget simple tilfælde løses i ét trin (som eksemplet i afsnit 3.4), men i de fleste tilfælde afhænger p_{ijr} af trafikbelastningen og $T_{a(n-1)}$ afhænger af andre matrix-elementer end $T_{ij(n-1)}$. Her er det derfor nødvendigt med en iterativ fremgangsmåde. Hvis denne konvergerer (hvilket let kan påvises i praksis som vist i afsnit 5), er antagelsen bag formelen samtidig opfyldt.

4.1 Et lille beregningseksempel

Tabel 3 viser brugen af MPME på det samme trafiknet som i figur 1. Resultatet heraf er vist i figur 5. T_{15} og T_{25} ændres kun på anden decimal efter 10 iterationer og giver hhv. 261,82 og 438,18. Til sammenligning giver en minimering af den vægtede kvadratafgivelse mellem talt og udlagt trafik hhv. 260,28 og 434,04. Dette er et bedre resultat end med SPME (jvf. afsnit 3.2).



Figur 5 Trafiknet med inkonsistente tællinger

Med hensyn til de andre eksempler med SPME (figur 2 og 3) giver MPME det samme resultat,

Ydre løkke (matrix- estimation)	Resultat af indre løkke (netudlæg- ning)	Netudlægning: Udlagt og forventet trafik på strækningsniveau					Matrixestimation: Forventet trafik ad ruter og estimerede matrix-elementer		
		a_{1-3}	a_{3-5}	a_{2-3}	a_{2-4}	a_{4-5}	$T_{(e)ijr}$	$T_{15(n-1)}$	$T_{25(n-1)}$
Trafiktællinger, V_a og udgangsmatrix $T_{ij(0)}$		240	600	300	120	140	-	300	360
Netudlægning	r_{1-3-5}	300	300	-	-	-			
	r_{2-3-5}	-	240	240	-	-			
	r_{2-4-5}	-	-	-	120	120			
	$T_{a(0)}$	300	540	240	120	120			
Matrix estimation	$T_{(E)1-3-5}$	240	333,33	-	-	-	286,67	286,67	-
	$T_{(E)2-3-5}$	-	266,67	300	-	-	283,33	-	413,33
	$T_{(E)2-4-5}$	-	-	-	120	140	130		
Netudlægning	r_{1-3-5}	286- ,67	286,67	-	-	-			
	r_{2-3-5}	-	275,56	275- ,56	-	-			
	r_{2-4-5}	-	-	-	137,78	137,78			
	$T_{a(1)}$	286- ,67	562,22	275- ,56	137,78	137,78			
Matrix estimation	$T_{(E)1-3-5}$	240	305,93	-	-	-	272,96	272,96	-
	$T_{(E)2-3-5}$	-	294,07	300	-	-	297,04	-	427,04
	$T_{(E)2-4-5}$	-	-	-	120	140	130		

Tabel 3 MPME benyttet på eksemplet i figur 5.
fordi der kun er én rute mellem hvert zone-par.

4.2 Egenskaber ved MPME

Hovedvægten i MPME lægges på tællingerne. Hvis estimationsproblemet er overbestemt (det sjældne tilfælde, hvor der er flere tællinger end matrix-elementer) vil det betyde at løsningen er uafhængig af udgangsmatricen. Hvis tællingerne er konsistente med den givne zone- og trafiknetsrepresentation samt rutevalgsmode, vil MPME blive ved med at modificere matricen indtil der er fuld overensstemmelse med tællingerne. Ud over disse egenskaber har praktiske test (inkl. figur 2 og 5) vist at løsningen er tæt på at minimere den vægtede kvadratafgivelse mellem talt- og beregnet trafik:

$$\min \left[\sum_a \frac{(T_a - V_a)^2}{V_a} \right] \quad (4)$$

I tilfælde med flere matrix-elementer end tællinger, ændres alle elementer med samme forhold med hensyn til den enkelte tælling. Dette vil dog blive udjævnet p.g.a. andre tællinger. Praktiske test har vist (inkl. figur 3), at løsningen er tæt på at minimere den vægtede kvadratafgivelse mellem udgangsmatricen og den estimerede matrix:

$$\min \left[\sum_{i,j} \frac{(T_{ij} - t_{ij})^2}{t_a} \right] \tag{5}$$

4.3 Håndtering af rutevalg og netudlægning

For større trafiknet er det primære problem i MPME at håndtere rutevalget givet ved p_{ijar} . Nielsen (1997a) viste, at dette kan gøres ved at udnytte nogle af egenskaberne i løsningsalgoritmen i SUE, hvorved MPME for første gang kunne benyttes på fuldskala net (som vist i afsnit 5). Da gennemgangen af løsningsalgoritmen er forholdsvis omfattende henvises til Nielsen (1997a).

5 PRAKTISKE ERFARINGER

Både MPME og SPME er benyttet i forbindelse med flere store modelarbejder. SPME blev implementeret tidligere end MPME¹. Derfor kan metoderne ikke umiddelbart sammenlignes m.h.t. beregningstid, men derimod godt m.h.t. deres faglige resultater. Fire trafikmodeller er benyttet i forbindelse med de praktiske afprøvninger af MPME:

- Den mindste model beskriver trafikken til og fra Kastrup Lufthavn. Modellen har kun 25 zoner og 121 strækninger, men udmærker sig ved at bygge på en grundig analyse af bilisters rutevalg (Vejdirektoratet, 1990). Således blev dette grundlag benyttet i forbindelse med vurdering af Hovedstadsmodellernes resultater (se punkt 4).
- Den mellemstore model dækker Næstved med omegn og foreligger i både en mindre og større version (med hhv. 134 og 314 strækninger samt 33 og 106 zoner). Sidstnævnte havde en langt bedre sammenhæng mellem zone- og trafiknetstrukturen. Udgangsmatricerne bedømmes til at have en rimelig kvalitet.
- Den tredje model dækker byen Bandung i Indonesien med omkring 5 mio. indb. Modellen har 180 zoner og 980 strækninger og udgangsmatricen er af ringe kvalitet.
- Den største model dækker København. Også denne model har to versioner med hhv. 97 og 269 zoner samt 2.422 og 2.765 strækninger (sidstnævnte for at forbedre en dårlig overensstemmelse mellem net- og zonestruktur). Udgangsmatricen er god i den mindste version og rimelig i den større. Det bemærkes at de to modeller ikke i fuldt omfang svarer til de gængse versioner af Hovedstadstrafikmodellen.

5.1 Metoder til analyse og kvalitetssikring af resultaterne

Der er benyttet en række metoder til analyse og kvalitetsikring af resultaterne. F.eks. blev afvigelser mellem talt- og udlagt trafik analyseret på forskellig vis – herunder ved brug af temakort. Resultater vedrørende rutevalgsmodellen blev derudover vurderet ved at vise udvalgte rutebundter, neg af ruter samt kombinationer heraf. Disse analyser blev foretaget v.h.a. forskellige GIS-værktøjer. Derudover blev matricerne også analyseret og sammenlignet.

¹ SPME blev implementeret af forfatteren i 1992 som et C-program forbundet med TransCAD 2.0 (Caliper, 1990). MPME blev implementeret Frederiksen (1996) som et selvstændigt C-program, hvor der blev gjort meget ud af at optimere koden. Idet Caliper Corp. har ændret dataformatet i TransCAD, har det ikke været muligt at opdatere SPME siden 1992, hvorfor implementeringen heraf er ret langsom.

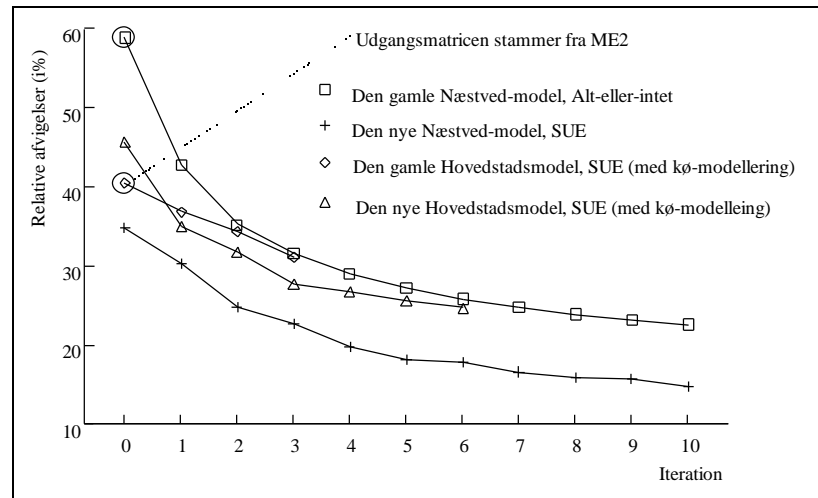
5.2 Evaluering af SPME

SPME blev testet på Næstved- og Hovedstadsmodellerne. Figur 6 viser et eksempel på konvergens tests (iteration 0 er resultatet, når udgangsmatricen udlægges på nettet). Udgangsmatricen i de to gamle modeller blev estimeret v.h.a. ME2. I alle tilfælde forbedrer SPME resultaterne på et aggregeret niveau, ligesom algoritmen konvergerer rimeligt hurtigt (på grund af det gamle software blev SPME kun kørt med få iterationer). For at supplere de aggregerede konvergensmål, blev de forskellige metoder omtalt i afsnit 5.1 benyttet. Som konklusion heraf kan nævnes:

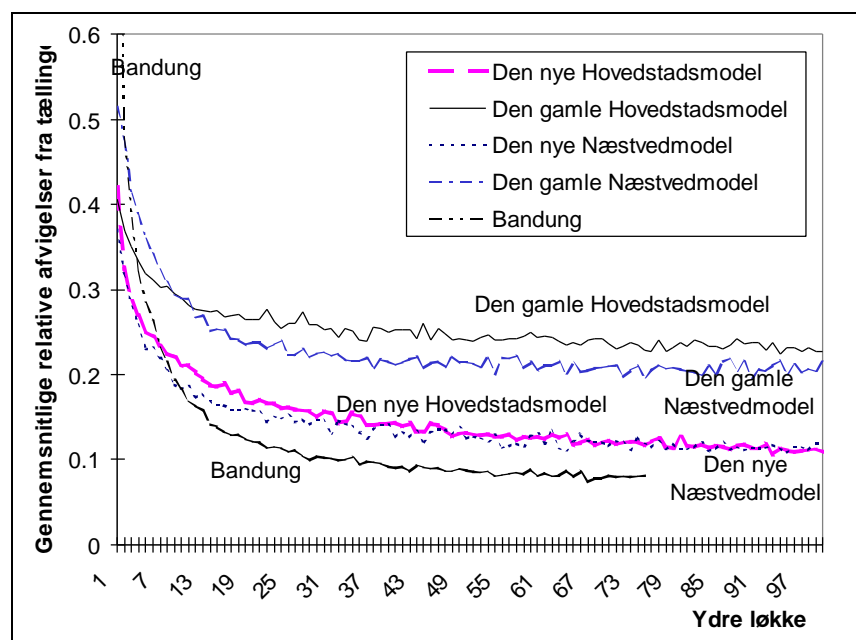
- SPME forbedrede de generelle resultater.
- Problematiske zone-par blev estimeret med mindre afvigelser, fordi SPME bygger på en mere avanceret rutevalgsmodel end de fleste matrixestimationsmetoder.
- Effekten af inkonsistente tællinger blev reduceret. Dette forbedrede resultaterne for kritiske vejstrækninger – typisk nær grænsen mellem forskellige Vejmyndigheder.
- Trafikken ad konkurrerende ruter blev beskrevet bedre.
- Trafikken i områder og strækninger med kapacitetsproblemer blev bedre beskrevet.

5.3 Evaluering af MPME

MPME baseret på SUE rutevalg blev testet på de samme cases som SPME, og derudover også på Bandung-modellen. I de sammenlignelige cases,



Figur 6 Gennemsnitlige relative afvigelser mellem talt og beregnet trafik som funktion af antal iterationer in MPME.



Figur 7 Gennemsnitlige relative afvigelser mellem talt og beregnet trafik som funktion af antal iterationer i MPME.

gav MPME mindre afvigelser fra tællinger og en bedre overensstemmelse med SUE. MPME konvergerede pænt i alle cases (figur 7 viser et eksempel herpå). Bemærk at udgangsmatricerne i de forskellige cases havde meget varierende kvalitet (den var specielt dårlig i Bandung-modellen). De større afvigelser i de gamle Næstved- og Hovedstadsmodeller sammenlignet med de nye skyldes de gamle modellens simplificerede net- og zonestruktur.

6 PRAKTISKE OVERVEJELSER VED BRUG AF MATRIXESTIMATIONS-METODER

I det følgende gives forskelle praktiske overvejelser og råd vedrørende brug af matrixestimationsmetoder – herunder SPME og MPME.

6.1 Ændringer for at håndtere zone-intern trafik

Den zone-interne trafik er problematisk ved brug af matrixestimationsmetoder, idet denne trafik ikke udlægges på trafiknettet og derved slet ikke indgår i estimationen. En simpel måde til at estimere den zone-interne trafik er at antage, at de relative ændringer af den zone-interne trafik er proportional med ændringerne af de tilsvarende rækker og søjler i matricen (Nielsen 1997a gennemgår beregningerne efter denne forudsætning). Denne antagelse har ingen generel gyldighed, idet ændringer i turfordeling, turlængder etc. ofte ikke er proportionale på zone-niveau, men antagelsen er dog bedre end helt at se bort fra problemet.

6.2 Ændringer for at håndtere ruter uden tællinger

Et andet problem er, hvis der ikke er tællinger langs nogle af ruterne i modellen, idet de tilhørende matrix-elementer da ikke kan opdateres. I MPME bør dette betragtes for hver iteration i den indre løkke, idet ruterne ændres fra iteration til iteration (i SPME er det kun nødvendigt for de optimale ruter). En måde at reducere dette problem kan være at benytte princippet i afsnit 6.1 (se Nielsen 1997a for en grundigere gennemgang). Problemet var størst i Bandung-modellen, hvor en korrektion for manglende tællinger forbedrede modelresultatet markant (se Nielsen og Israelsen, 1996). Imidlertid skjuler en korrektion for manglende tællinger til en vis grad problemerne hermed. Det anbefales derfor at indbygge et flag δ_{ij} i algoritmen, der for hvert zone-par viser, hvor stor en andel af ruterne, der ikke indeholdt tællinger. Herved kan der efterfølgende bedre tages højde herfor.

6.3 Ruter med én eller få tællinger

Et tredje problem ved matrixestimationsmetoder er, hvis elementer kun estimeres ud fra én eller få tællinger. Dette kan forekomme ved korte ruter, ved en uheldsmæssig fordeling af tællingerne i nettet eller ved generelle problemer vedrørende trafiknet- og zonestrukturen. I dette tilfælde kan SPME og MPME ændre zone-parret til at opnå perfekt overensstemmelse med tællingen, skønt denne måske er inkonsistent i forhold til andre tællinger. Hvis matricen benyttes som pivot-matrix eller i skitse-mæssige modeller, betyder det blot, at der til en vis grad tages højde for problemerne med modellens datagrundlag (eller at de skjules). Hvis matricen derimod benyttes som grundlag for estimationen af en egentlig trafikmodel (f.eks. dens turlængdefordeling), vil det derimod kunne lede til en fejlestimeret model. En praktisk måde at

teste for svage matrix-elementer er at beregne det gennemsnitlige antal snitællinger langs ruter mellem hvert zone-par η_{ij} . Derefter vil matrix-elementer med store ændringer i forhold til udgangsmatricen og med små η_{ij} 'er kunne undersøges manuelt.

6.4 Kvaliteten af tællingerne

Generelt vægtes alle tællinger ens i matrixestimationsmetoder. Imidlertid kan metoderne sagtens justeres, så tællingerne vægtes efter hvor stor kvalitet de antages at have; f.eks. om de er talt af en fast tællestation eller blot i et kortere tidsrum. Tællingerne kan også vægtes efter strækningernes længder.

6.5 Validiteten af resultaterne

Mange forskellige turmatricer vil rent matematisk kunne reproducere de samme trafikællinger. Således er der en risiko for, at den estimerede matrix vil give en lille afvigelse fra den talte trafik, selvom den ikke svarer til det virkelige turmønster. Dette kan bl.a. skyldes, at:

1. Turmønstret i virkeligheden er ændret signifikant i forhold til udgangsmatricen. I dette tilfælde bør modellen i stedet estimeres ud fra rejsevaneundersøgelser.
2. Turlængdefordelingen er systematisk anderledes end i matricen. Dette kan eksempelvis forekomme, hvis udgangsmatricen er frembragt ved brug af en gravitationsmodel.
3. Rutevalgsmodellerne er uhensigtsmæssige, hvorved matricen fejlagtigt tvinges til at afspejle disse modeller.
4. Der er problemer med repræsentationen af trafiknet og zonestruktur i modellen.

Sidstnævnte problem kan reduceres ved brug af følgende praktiske råd:

- Check trafiknet og zonestrukturen grundigt, herunder om tællingerne er fornuftigt fordelt i området. Brug δ_{ij} 'erne og η_{ij} 'erne som indikatorer herpå som anbefalet i afsnit 6.2 og 6.3. Check at ingen tællinger omfatter nævneværdig zone-intern trafik (tællingerne placeres mest hensigtsmæssigt på zonegrænser).
- Søg efter matrix-elementer med store absolutte og/eller relative afvigelser i forhold til udgangsmatricen, og bedøm disse ud fra lokalkendskab eller supplerende data.
- Check de enkelte zoners turproduktioner (matricens række- og søjlesummer) og sammenlign dem med rejsevaneundersøgelser eller modelresultater.
- Sammenlign udlagt og talt trafik på netniveau. Vurder rutevalgsmodellen ved at vise ruter, rutebundter og neg af ruter over specifikke strækninger.

7 KONKLUSIONER OG PERSPEKTIVER FOR BRUG AF METODERNE

Trafikmodeller kan ofte estimeres langt billigere ud fra matricer end ved brug af rejsevaneundersøgelser. Artiklen har præsenteret to metoder der estimerer turmatricer ud fra trafiktællinger kombineret med ældre udgangsmatricer. Begge metoder er i stand til at håndtere inkonsistente og usikre tællinger. De to metoder bygger derudover på avancerede stokastiske og kapacitetsafhængige rutevalgsmodeller som anbefalet af Nielsen (1996b).

Den første metode, SPME (Single Path Matrix Estimation) er lettest at implementere, men har også en mere heuristisk natur end den anden metode, MPME (Multiple Path Matrix Estimation). MPME benytter nemlig alle tællinger langs alle ruter til estimation af det enkelte matrix-element, mens SPME kun benytter tællingerne langs den optimale rute. I de praktiske modelafprøvninger betød det, at MPME konvergerede pænere end SPME og at løsningen gav en bedre overensstemmelse med tællingerne. Det bemærkes dog, at begge metoder gav en markant forbedring i forhold til udgangsmatricerne – hvoraf nogle i øvrigt var estimeret v.h.a. den ofte brugte ME2-metode. SPME og MPME giver særligt store forbedringer i trafiknet med konkurrerende ruter, hvilket er tilfældet i de fleste store og mellemstore byområder.

Det vigtigste perspektiv for praktikere er, at metoderne virker på fuldskala trafikmodeller. Dette er opnået ved, at de bygger på forholdsvist simple heuristiske antagelser i stedet på matematiske programmer – hvilket fra et teoretisk synspunkt dog ville være at foretrække.

Både SPME og MPME afhænger af turmønsterbeskrivelsen i udgangsmatricen, men kan ændre en del herpå for at reproducere tællingerne. Dette er en fordel i mere skitse-mæssige modelarbejder, hvor en eksisterende matrix ønskes opdateret som grundlag for selve trafikmodellen, som pivot-matrix eller direkte til brug i en model, der kun omfatter rutevalg (til vurdering af konsekvenser af mindre ændringer af trafiknettet). Da metoderne afhænger af udgangsmatricen er det imidlertid nødvendigt at opdatere informationen heri fra tid til anden med mere omfattende rejsevaneundersøgelser. I mere ambitiøse modelarbejder er matrixestimationsmetoder for upræcise, og bør i det mindste suppleres med nye rejsevaneundersøgelser.

Rasmus Dyhr Frederiksen takkes for hjælp med at implementere MPME og for hjælp til testkørsler hermed. Thomas Israelsen og Erik Rude Nielsen takkes for testkørslerne med Bandungmodellen. Transportrådet takkes for økonomisk støtte til projektet.

REFERENCER

- Ben-Akiva, M. (1987) *Methods to Combine Different Data Sources and Estimate Origin-Destination Matrices* Elsevier Science Publishing Co., Transportation and Traffic Theory, pp.459-580.
- Ben-Akiva, M. and Morikawa, T. (1989) Data Fusion Methods and their Applications to Origin-Destination Trip Tables *WCTR Proceedings 1989*.
- Caliper Corporation (1990) *TransCAD Reference Manual, Version 2.0*. Newton, Massachusetts.
- Caliper Corporation (1996). *Travel Demand Modelling with TransCAD 3.0*. Newton, Massachusetts.
- Daganzo, C.F. & Sheffi, Y (1977). On Stochastic Models of Traffic Assignment. *Transportation Science*, No. 11(3), pp.253-274.
- Dial, R.B (1971). A probabilistic Multipath Traffic Assignment Algorithm which obviates Path Enumeration. *Transportation Research*. No. 5(2), pp.81-111.

- Frederiksen, Rasmus Dyhr (1997). *MPME - Implementering og test af en metode til turmatrix estimation, baseret på Stokastisk Bruge Equilibrium. Journal over arbejde og resultater*. Kursusarbejde, IFP/DTU, Januar.
- Nielsen, Erik Rude & Israelsen, Thomas (1996). *Implementing a Traffic Model for Bandung using GIS*. Eksamensprojekt, IFP/DTU.
- Nielsen, O.A. (1994a) A new method for estimating trip matrices from traffic counts. *Seventh International Conference on Travel Behaviour*, Chile, Pre-prints, pp.2-14.
- Nielsen, Otto Anker (1994b). *Optimal brug af Persontrafikmodeller - En analyse af Persontrafikmodeller med henblik på dataøkonomi og validitet*. Ph.D.-Afhandling. Rapport No. 76, IVTB, DTU.
- Nielsen, Otto Anker (1995). En diskussion af dagens brug af trafikmodeller. *Trafikdage på AUC'95*. Bind 2, pp.633-652.
- Nielsen, O.A. (1996a) Do Stochastic Traffic Assignment Models consider differences in Road Users' Utility Functions? *24th European Transport Forum*, Proceedings Seminar D&E, PTRC, London, September.
- Nielsen, Otto Anker (1996b). Nye modeller for rutevalg. *Trafikdage på AUC'96*.
- Nielsen, O.A. (1997a). Multi-Path OD-Matrix Estimation (MPME) based on Stochastic User Equilibrium Traffic Assignment. *TRB-Annual meeting*, Washington, January. Pre-prints, Vol. III, 0234.
- Nielsen, O.A. (1997b). On the distribution of the stochastic component in SUE traffic assignment models. *25th European Transport Forum, PTRC*, London.
- Nielsen, O.A., Frederiksen, R.D. & Simonsen, N. (1997). Stochastic user equilibrium traffic assignment with turn delays in intersections. *Seventh international conference on information systems in logistic and transport*, Gothenburg, June.
- Ortúzar, J.de D. & Willumsen, L.G. (1990) *Modelling Transport*. John Wiley & Sons.
- Sheffi, Y. (1985) *Urban Transportation Networks*. Prentice Hall, Inc, Englewood Cliffs, NJ.
- Sheffi, Y. & Powell, W.B (1981). A comparison of Stochastic and Deterministic Traffic Assignment over Congested Networks. *Transportation Research B*, No. 15(1), pp.53-64.
- Sheffi, Y. & Powell, W.B (1982). An Algorithm, for the Equilibrium Assignment Problem with Random Link Times. *Networks*, 12(2), pp.191-207.
- Slavin, Howard (1996) An integrated, dynamic approach to travel demand forecasting. *Transportation*, Special Issue: A New Generation of Travel Demand Models, No. 23, pp.313-350.
- Tamin, O.Z. & Willumsen, L.G. (1989). Transport demand model estimation from traffic counts. *Transportation* 16, pp.3-26.
- Van Vuren, Tom (1994) The trouble with SUE stochastic assignment options in practice. Proceedings *PTRC Summer Annual Meeting*. England, Seminar H, pp.41-52.
- Van Zuylen, H.J. and Willumsen, L.G. (1980). The most likely trip matrix estimated from traffic counts. *Transportation Research*, Vol. 14B, No.3, September 1980, pp.281-293.
- Vejdirektoratet, ØSA (1990). *Biltrafikken mod Københavns Lufthavn Kastrup - Analyse og vurdering af konsekvenserne af en Tårnbymotorvej*. Udført af Anders Nyvig A/S.
- Willumsen, L.G. (1981) Simplified transport models based on traffic counts. *Transportation* 10, pp.257-278.